УДК 621.318.38

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ АКТИВАТОРОМ

Р.Ф. Бекишев, А.С. Глазырин, С.В. Цурпал

Томский политехнический университет
E-mail: EPATPU@mail2000.ru

Приведены основные требования, предъявляемые к системе автоматического управления вибрационным электромагнитным активатором. Представлена математическая модель системы управления с помощью которой, проведен анализ временных и частотных характеристик электромагнитного активатора при работе в различных средах.

Для снижения вязкости нефтепродуктов и химических жидкостей и суспензий применяют вибрационные электромагнитные активаторы (ВЭМА) с якорем специальной формы [1].

До последнего времени систем автоматического управления (САУ) вибрационными электромагнитными активаторами (ВЭМА) не существовало. Однако без САУ представляется затруднительным использовать в полной мере все достоинства ВЭМА. Поэтому была поставлена задача разработки и исследования систем питания и автоматического управления ВЭМА.

Применение системы автоматического управления позволяет использовать все полезные свойства вибрационного электромагнитного активатора при работе в различных рабочих средах, в том числе при обработке высоковязких нефтепродуктов.

Приведём основные требования к разрабатываемой САУ ВЭМА [2, 3]. Система должна:

- настраиваться на максимальный КПД устройства; путь достижения – резонансный режим работы механической части с использованием дополнительной корректировки формы тока;
- настраиваться на максимальную полезную мощность, или, другими словами, на предельную амплитуду колебаний якоря – активатора;
- обеспечивать максимально возможный коэффициент мощности;
- обрабатывать аварийные ситуации, как в электрическом, так и в механическом контуре.

Одним из эффективных методов исследования САУ ВЭМА является математическое моделирование [4]. Математическая модель САУ ВЭМА включает в себя модель системы питания (силовой части САУ) и модель управляющей части САУ, рис. 1, 2.

Математическая модель САУ ВЭМА основана на системе уравнений:

$$\begin{cases} U_c(t) = U_{c,\partial}\sqrt{2}\sin(2\pi f_c t), \\ \Psi_\kappa = f(U_c, frv, fpch, \delta, t), \\ i_\kappa(\Psi_\kappa,\delta) = \dfrac{H\left(\dfrac{\Psi_K}{w_K S_{\text{МП}}}\right) l_{МП} + \dfrac{\Psi_K}{w_K} R_M(\delta)}{2\cdot w_K}, \\ F_{\text{ЭМ}}(\Psi_K) = \dfrac{\Psi_K{}^2}{w_K{}^2 S_{\text{МП}}\mu_0}, \\ F_{\mathbf{ЭМ}}(t) = m_\Sigma a(t) + R_{\mathbf{МЕХ}(V(t))}V(t) + x(t)k_\Sigma, \\ x(t) = \delta_0 - \delta(t), \\ V(t) = \dfrac{dx(t)}{dt}, \\ a(t) = \dfrac{d^2x(t)}{dt^2}, \\ frv = f(U_0, U_1, U_2, i_1, i_\kappa, a, t), \\ fpch = f(U_0, U_1, U_2, i_1, i_\kappa, a, t), \end{cases} \quad (1)$$

где U_c – сетевое напряжение (здесь и далее все единицы физических величин в системе СИ), t – текущее время, $U_{c,\partial}$ и f_c – действующее значение и частота сетевого напряжения, Ψ_κ – потокосцепление катушки, frv и $fpch$ – флаги состояний ключей преобразователей напряжения и частоты, δ – величина зазора магнитной цепи, i_κ – ток катушки, $i_\kappa(\Psi_\kappa,\delta)$ – вебер-амперная характеристика катушки, $B = \dfrac{\Psi_\kappa}{w_\kappa S_{\text{МП}}}$ – магнитная индукция, $H(B)$ – основная кривая намагничивания стальных участков магнитной цепи ВЭМА, $F_{\text{ЭМ}}$ – электромагнитная сила, стягивающая зазор, определяемая по формуле Максвелла [5], k_Σ – суммарная жёсткость системы «пружина-стенка корпуса», δ_0 – величина магнитного зазора при неработающем ВЭМА (положение равновесия), $x(t)=\delta_0-\delta(t)$ – смещение якоря-активатора относительно положения равновесия, $V(t) = \dfrac{dx(t)}{dt}$ и $a(t) = \dfrac{d^2x(t)}{dt^2}$ – скорость и ускорение якоря-активатора, m_Σ – суммарная колеблющаяся масса, $R_{\text{МЕХ}(V(t))}$ – механическое сопротивление, U_0 – напряжение на выходе выпрямительного моста – сигнал обратной связи с датчика напряжения ДН$_0$, U_1 – напряжение на конденсаторе накопителя С$_1$ – сигнал обратной связи с датчика напряжения ДН$_1$, U_2 – напряжение на конденсаторе С$_2$ («ёмкость сброса») – сигнал обратной связи с датчика напряжения ДН$_2$, i_1 – ток дросселя преобразователя напряжения – сигнал обратной связи с датчика тока ДТ$_1$, $frv=f(U_0,U_1,U_2,i_1,i_\kappa,a,t)$ и $fpch=f(U_0,U_1,U_2,i_1,i_\kappa,a,t)$ – флаги состояния ключа преобразователя напряжения frv и состояния ключей преобразователя частоты $fpch$, которые как функции координат обратной связи и времени реализованы в САУ ВЭМА в соответствии с алгоритмом управления.

Математическая модель объекта управления (ВЭМА) включает в себя механический и магнитный контуры. Расчет механического контура рассмотрен в [6].

Силовая схема САУ ВЭМА состоит из преобразователей напряжения (рис. 1) и частоты (рис. 2). На схемах замещения используются следующие обозначения: $\text{flag}_{vt1}=frv$ и $\text{flag}_{vt23}=fpch$ – флаги состояний ключей преобразователей напряжения и частоты (1 – включен, 0 – выключен), L_{1TV}, L_{2TV} – индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток развязывающего трансформатора, M_{12TV} – взаимная индуктивность между обмотками трансформатора, R_{1TV}, R_{2TV} – омические сопротивления обмоток, $R_{\mu TV}$ – эквивалентное сопротивление потерь в стали трансформатора TV1, $R_{\text{дн}0}$, $R_{\text{дн}1}$, $R_{\text{дн}2}$, $R_{\text{дт}1}$, $R_{\text{дт}2}$ – сопротивления датчиков напряжения и тока, i_{ymvt}, i_{ymvd} – токи утечек транзисторных ключей и диодов, U_{vt}, – падение напряжения на открытом транзисторном ключе, U_{vd} – падение напряжения на открытом диоде, $M_{\kappa12}$, $M_{\kappa34}$, $M_{\kappa56}$ – взаимные индуктивности и $R_{\kappa1}$–$R_{\kappa6}$ – омические сопротивления катушек ВЭМА, $L_{\kappa1}$–$L_{\kappa6}$ – индуктивности рассеяния катушек ВЭМА, L_1 и R_1 – индуктивность и сопротивление дросселя регулятора напряжения, $U_{\text{ПИТ}}$ – напряжение на входе мостового выпрямителя, U_{C1}^{-} – напряжение на накопителе C_1, $R_{n\mu}$ – эквивалентное сопротивление потерь в стали ВЭМА (при параллельном включении катушек), определяемое как [7]

$$R_{n\mu} = \frac{16\rho_c w_\kappa{}^2 S_{мп}}{l_{мп}\delta_л{}^2}, \quad (2)$$

где ρ_c – удельное электрическое сопротивление листовой стали магнитопровода, $S_{мп}$ – площадь его поперечного сечения, w_κ – число витков катушки, $l_{мп}$ – общая длина стальных участков и $\delta_л$ – толщина листов стали магнитопровода.

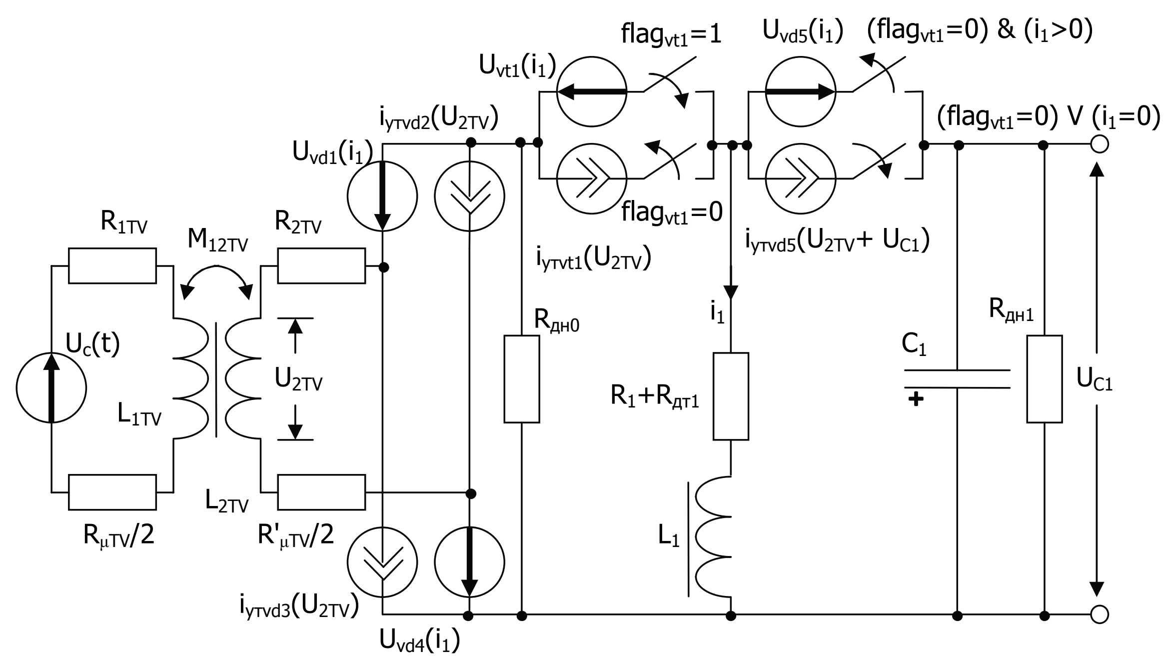


Рис. 1. *Схема замещения силовой части САУ ВЭМА. Преобразователь напряжения*

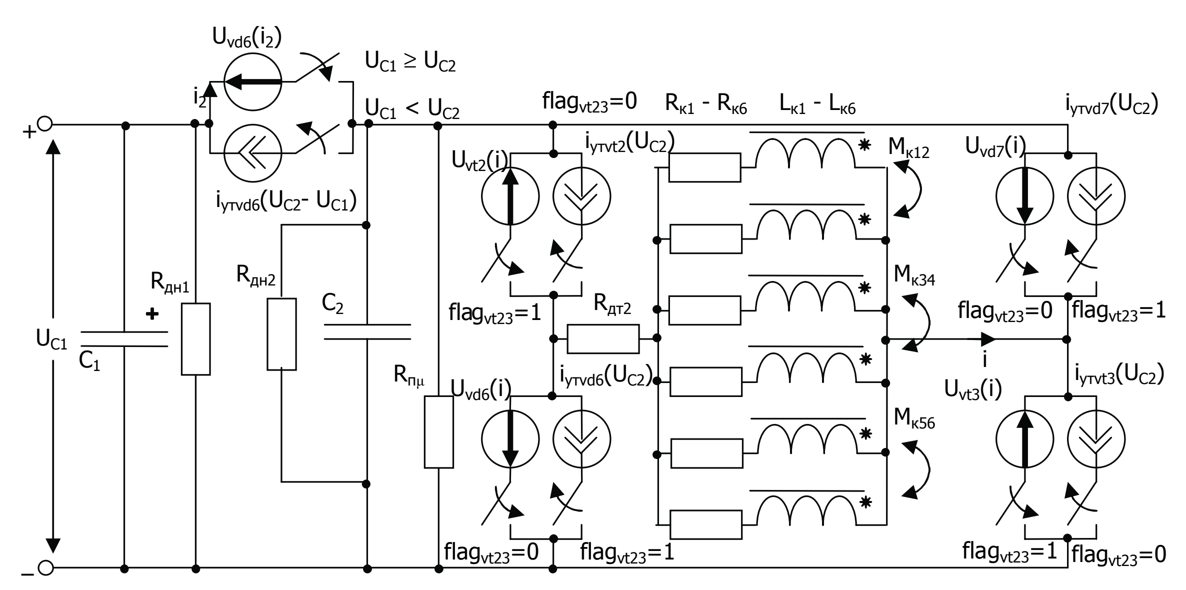


Рис. 2. *Схема замещения силовой части САУ ВЭМА. Преобразователь частоты*

Вынуждающая колебания электромагнитная сила определяется:

$$F_{\text{ЭМ}} = \frac{\Psi_K^{\ 2}}{w_K^{\ 2} S_{\text{МП}} \mu_0}, \qquad (3)$$

где: μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Уравнение равновесия механического контура ВЭМА:

$$F_{\mathbf{ЭМ}}(t) = m_\Sigma \frac{d^2x(t)}{dt^2} + R_{\mathbf{МЕХ}(V(t))} \frac{dx(t)}{dt} + x(t)k_\Sigma . \qquad (4)$$

Математическая модель системы питания и управления ВЭМА имеет допущения:

- все якори-активаторы колеблются синхронно вследствие конструктивной идентичности колебательных каналов,
- ключи преобразователя частоты работают синхронно,
- потери в стали вынесены в электрический контур и учитываются эквивалентным сопротивлением $R_{п\mu}$.

Для интегрирования дифференциальных уравнений, входящих в систему (1), применён метод Рунге-Кутта второго порядка [8]. Шаг интегрирования определяется, исходя из постоянных времени механического и электрического контура ВЭМА.

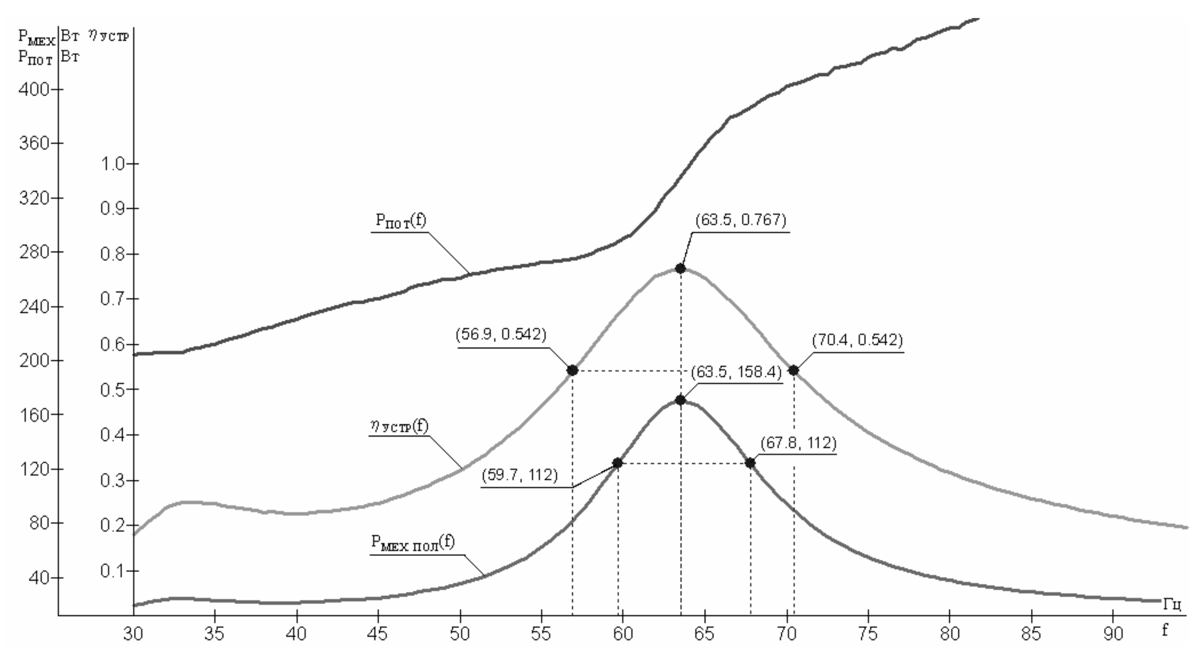


Рис. 3. *Энергетические координаты ВЭМА в функции частоты*

Для моделирования процессов в САУ ВЭМА разработан прикладной программный продукт, позволяющий получать и анализировать временные и частотные характеристики при работе САУ.

Согласно полученным энергетическим характеристикам в диапазоне частот от 30 до 70 Гц наблюдается максимум КПД $\eta_{УСТР}$=0,77.

Таким образом, разработанная математическая модель САУ ВЭМА позволяет получать и анализировать временные и частотные характеристики при работе активатора в различных рабочих средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2128547 РФ. МПК B01F 11/00, 13/08. Виброструйный перемешиватель и разжижитель жидкостей и суспензий / С.П. Гузеев, В.А. Данекер, С.В. Рикконен, А.К. Хорьков. – Опуб. в Б.И. № 10, 1999.
2. Глазырин А.С., Данекер В.А., Доленко В.В., Саидов В.С. Разработка системы управления виброструйным электромеханическим преобразователем // Технология и автоматизация атомной энергетики: Матер. регион. научно-техн. конф. – Северск, 2001. – С. 22–24.
3. Глазырин А.С., Бекишев Р.Ф. Система управления виброструйным электромеханическим преобразователем // Проблемы развития автоматизированного электропривода промышленных установок: Матер. Всеросс. научно-практ. конф. – Новокузнецк, 2002. – С. 48–50.
4. Глазырин А.С., Данекер В.А., Доленко В.В., Саидов В.С. Математическая модель виброструйного электромеханического преобразователя // Технология и автоматизация атомной энергетики: Матер. регион. научно-технич. конф. – Северск, 2001. – С. 19–21.
5. Гаранин А.Ю., Силаева Е.В., Шлегель О.А., Попенко В.Н. Расчёт тягового усилия электромагнита постоянного тока // Электротехника. – 2003. – № 2. – С. 55–57.
6. Глазырин А.С., Данекер В.А., Кособуцкий А.А. Свободно-вынужденные колебания в механической системе виброструйного электропривода на резонансной частоте // Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение: Труды V Междунар. конф. МКЭЭЭ-2003. Ч. I. Крым. – Алушта, 2003. – С. 786–789.
7. Матханов П.Н., Гоголицын Л.З. Расчёт импульсных трансформаторов. – Л.: Энергия, 1980. – 112 с.
8. Бахвалов Н.С. Численные методы. – М.: Наука, 1973. – 632 с.